

## 天然碳氢制冷剂R290在汽车空调中的应用研究

柳慈翀, 张耘, 高天元, 王天英, 施骏业, 陈江平  
(上海交通大学制冷与低温研究所, 上海 200030)

**摘要:** 在 HC<sub>s</sub> 制冷剂热物性分析的基础上, 对不同比例的 R290 (丙烷) 和 R600a (异丁烷) 混合物的饱和蒸气压、单位容积制冷量进行了分析, 并与 R134a 进行了比较, 找出了 R290 和 R600a 混合物替代 R134a 的最佳混合比约为 (R290/R600a) 60%/40%。并在一台巴士汽车空调上对 R290/R600a (60%/40%) 和 R134a 的制冷性能进行了测试, 结果表明: R290/R600a (60%/40%) 的制冷系数约比 R134a 高约 2%, 制冷量比 R134a 高约 10%。从制冷性能上, R290/R600a (60%/40%) 可以作为 R134a 在汽车空调上的直接替代工质。

**关键词:** 热力学; 制冷剂; 碳氢化合物; 汽车空调

中图分类号: TB 61

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157(2018)09-2048-05

## Application study on hydrocarbon refrigerant R290 in automotive air conditioners

LIU Cichong, ZHANG Yun, GAO Tianyuan, WANG Tianying, SHI Junye, CHEN Jiangping  
(*Refrigeration and Cryogenics Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China*)

**Abstract:** This paper analyzes the saturated pressure, and refrigeration capacity per unit volume of R290 (propane) and R600a (isobutene) mixture with different mixing ratios, on the basis of thermodynamic properties of hydrocarbons. Compared with R134a, R290/R600a mixture with the ratio of 60%/40% is the best to replace R134a. Refrigeration performances of R134a and R290/R600a mixture were tested in a bus air conditioner. The results showed that performance of refrigeration coefficient and refrigeration capacity of R290/R600a (60%/40%) blend were about 2% and 10% higher respectively, than those of R134a. R290/R600a (60%/40%) can be a substitute refrigerant to replace R134a in car air conditioners.

**Key words:** thermodynamics; refrigerant; hydrocarbon; car air conditioner

### 引 言

CFCs 和 HCFCs 制冷剂一出现, 就以其良好的热力性质及对人的安全性, 在制冷领域占据了主导地位。然而 1974 年 Molina 和 Rowland 指出: CFCs 和 HCFCs 物质对大气臭氧层有严重的破坏作用。常用的主要制冷剂 (比如 R12 和 R22) 中大多数为 CFCs 或 HCFCs 类物质, 由于人们对这些物质的长

期大量使用, 南极上空已出现大面积的臭氧层空洞, 为了保护人类得以生存的自然环境, 必须停止它们的使用。新型可替代它们的制冷剂不仅要具有与它们相当的制冷性能, 而且要对臭氧层无破坏作用, 又要不会造成安全问题。HFCs 制冷剂除了对润滑油的互溶性不如前两类物质外, 具有与前两者相近的制冷性能和安全性, 因此 R134a 替代 R12 和 R22 在汽车空调、家用冰箱、家用空调, 以及其他制冷装置上得到广泛的应用。随着地球变暖趋势的加剧,

2018-06-22 收到初稿, 2018-08-21 收到修改稿。

联系人及第一作者: 柳慈翀 (1993—), 女, 博士研究生, 工程师。  
万方数据

Received date: 2018-06-22.

Corresponding author: LIU Ci Chong E-mail: liucichong@hui.sjtu.edu.cn

温室气体对大气层的影响也对人们敲响了警钟。HFCs 物质虽对臭氧层没有破坏作用，却具有很高的温室效应，是造成大气变暖的罪魁祸首之一，为了缓解大气变暖的因素，HFCs 物质的使用也必须得到控制，《京都议定书》列出的温室气体，HFCs 赫然在列，因此，R134a 等 HFCs 物质迟早也要被淘汰出制冷领域。

尽管人们试图寻找一种既具有良好热力性质，又对环境友好，又要安全的物质来作为制冷剂，但经过 30 多年的努力，至今仍没有找到。如果抛开绝对安全因素，不少自然制冷剂不仅具有良好的热力性质，而且对环境是绝对友好的，比如  $\text{NH}_3$ 、碳氢化合物 (HCs) 等。这些物质早在一个世纪前就曾被人们拿来作为制冷剂<sup>[1]</sup>，由于它们本身安全性方面存在缺陷，比如  $\text{NH}_3$  剧毒，碳氢化合物 (HCs) 易燃，在 CFCs 物质出现后，它们就淡出制冷领域，仅在某些特殊行业还用作制冷剂。在小型制冷装置上，由于制冷剂充注量有限，安全性不会成为主要问题，因此，人们对碳氢化合物在小型制冷装置上的应用研究近些年逐渐多起来<sup>[2-9]</sup>。

HCs 制冷剂是石油化工的副产品，有着丰富的资源，低廉的成本。而且 HCs 制冷剂一般都有较大的汽化潜热，较低的沸点和临界温度比值，较好的输运特性<sup>[10-11]</sup>，使得 HCs 制冷剂一般都有非常好的制冷性能。许多研究结果表明，在冰箱等小型装置上用 R290/R600 或 R290/R600a 混合物替代 R134a 或 R12，可以实现制冷装置效率的提高<sup>[3-8]</sup>；R290 替代 R22 在小型热泵装置上应用，也可得到比 R22 高的制冷效率<sup>[9]</sup>。

目前，在汽车空调上广泛使用的制冷剂还是 R134a，而汽车空调的软管的渗透作用和接头的松动是制冷剂泄漏的主要原因，一般情况汽车空调每两年就要加注一次制冷剂，因此，汽车空调制冷剂的消耗量是巨大的，而数量巨大的汽车泄漏的 R134a 对大气温室效应的贡献也是不容忽视的，因此，替代汽车空调中的 R134a 意义非常。HCs 制冷剂在汽车空调上的应用一直受着其可燃性质的限制，Maclaine-cross 对碳氢制冷剂在汽车空调上应用的危险性进行过评价<sup>[12-13]</sup>，认为汽车空调在充注碳氢制冷剂的情况下，其充注量仅相当于汽车燃油携带量的约 1%，而且汽车空调除蒸发器外，其他部件均不与乘坐空间相通，造成危险的可能性是非常小的。

由于碳氢制冷剂在汽车空调上应用的限制，碳

氢制冷剂在汽车空调上应用方面的文献还不多见。本文在热力学分析的基础上，对碳氢制冷剂替代 R134a 用于汽车空调的混合比进行了分析，并在实验的基础上，对碳氢制冷剂替代 R134a 的性能进行了探讨。

## 1 HCs 制冷剂替代 R134a 的热物性分析

### 1.1 饱和蒸气压对比

制冷剂的灌注式替代要求替代用的制冷剂应与被替代制冷剂有相近的饱和蒸气压，图 1 为不同比例的 R290/R600a 混合物的饱和蒸气压曲线与 R134a 的对比。由图中可以看出，随着 R290 成分的增加，R290/R600a 混合物的饱和蒸气压是增高的，但要想通过调配 R290/R600a 的比例使得混合物的饱和蒸气压在很宽的温度范围内与 R134a 一致是不可能的。因为由图中可以看出，R134a 的蒸气压随温度的变化率比 R290/R600a 混合物的饱和蒸气压随温度的变化率大，这意味着在某一温度下与 R134a 饱和蒸气压相等的 R290/R600a 混合物，在低于此温度时，R290/R600a 混合物的饱和蒸气压高于 R134a；在高于此温度时，R290/R600a 混合物的饱和蒸气压低于 R134a。这一点对一般制冷系统来说是有利的，因为可以使冷凝器的压力减小，蒸发器的压力提高，可以减小冷凝器的承压和避免出现蒸发器抽真空。

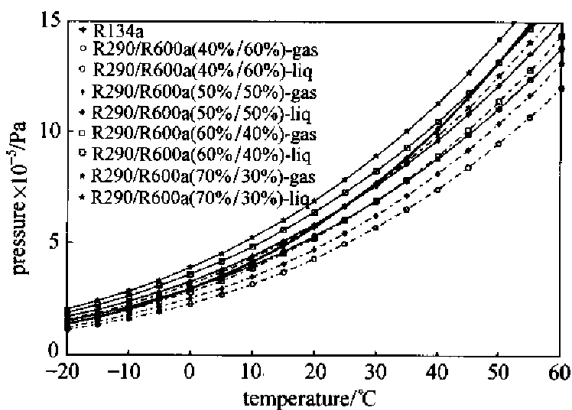


Fig. 1 Comparison of saturated pressure between R134a and R290/R600a blends

由图 1 中还可以看出，R290/R600a 混合物的饱和液和饱和汽相压力在同一温度下是不同的，这是与 R134a 等纯工质不同的，R290/R600a 混合物存在温度滑移（在正常制冷温度范围内约为 6 ~

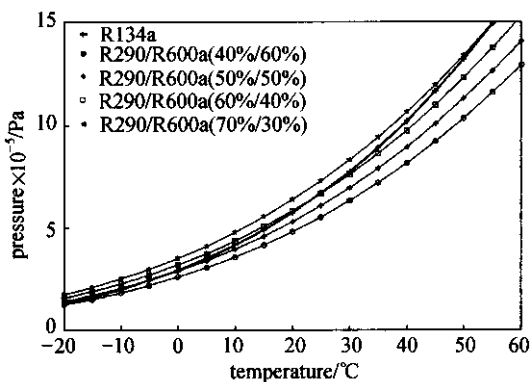


Fig. 2 Comparison of average saturated pressure between R134a and R290/R600a blends

8℃). 一般来说, 温度滑移可以加强逆向流程的换热器的换热, 因此, 利用混合制冷剂有可能提高系统的制冷性能.

图 2 为 R290/R600a 混合物的液相和汽相饱和压力的平均值与 R134a 的比较曲线. 由图中可以看出, R290/R600a (60%/40%) 的混合物在温度较低时饱和压力稍高于 R134a, 在温度较高时, 饱和压力稍低于 R134a, 在常用制冷温度范围内与 R134a 接近, 因此, R290/R600a 的混合物比例约在 60%/40% 情况下有可能可以灌注式替代 R134a.

### 1.2 替代 R134a 的 R290/R600a 混合比

要想实现制冷剂的灌注式替代, 其中一个很重要的因素是替代工质的单位容积制冷量应与被替代制冷剂相当. 因为在装置一定的情况下, 压缩机的容积排气量就确定了, 装置的制冷量就由制冷剂的单位容积制冷量和压缩机容积排气量的乘积决定, 即

$$Q_0 = q_v V_c \quad (1)$$

压缩机耗功可由式 (2) 表示

$$W = Q_0 / COP \quad (2)$$

装置是为了满足某种需要而进行设计的, 由于对制冷量需求的限制, 在制冷剂替代后, 装置的制冷量应不能发生大的变化. 由式 (1) 可知替代工质的单位容积制冷量应与被替代制冷剂相当. 如果替代制冷剂的单位容积制冷量太小, 则装置的制冷量就会比替代之前下降很多, 就不能满足对冷量的要求. 如果替代制冷剂的单位容积制冷量太大, 则压缩机的耗功就会增加, 从而有可能造成压缩机超载而使压缩机损坏.

图 3 给出了在某一工况下, 4 种 R290/R600a 混合物的单位容积制冷量与 R134a 的对比. 由图中可

以看出, R290/R600a (60%/40%) 的混合物在很宽的温度范围内与 R134a 非常接近, 即用 R290 和 R600a 的混合物灌注式替代 R134a 的比例应在 R290/R600a (60%/40%) 混合比附近.

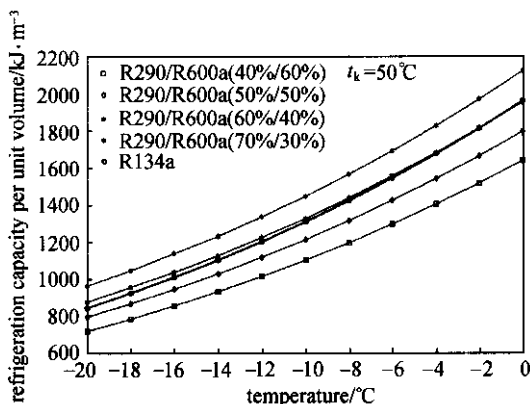


Fig. 3 Comparison of refrigeration capacity per unit volume between R134a and R290/R600a blends with different evaporating temperature

为了进一步探询 R290/R600a 的混合比, 将图 3 转换成 R290/R600a 混合物的单位容积制冷量与混合成分的关系, 如图 4 所示. 由图 4 可以看出, 与 R134a 具有相同单位容积制冷量的混合比大约在 R290 质量含量为 55% ~ 60% 左右, 随着蒸发温度的降低, R290 含量稍有降低. 从而确定, 混合比在 R290/R600a (60%/40%) 的混合物应可以作为空调应用时 R134a 的灌注式替代工质.

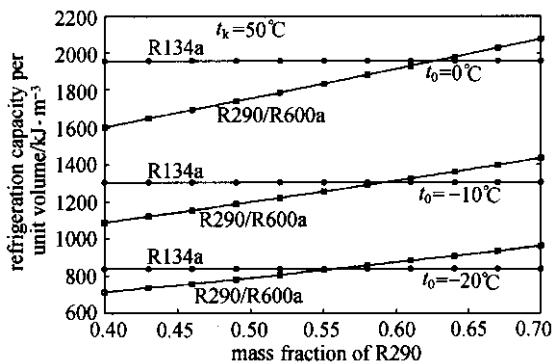


Fig. 4 Comparison of refrigeration capacity per unit volume between R134a and R290/R600a blends with different mass fraction of R290

## 2 R290/R600a 混合制冷剂在汽车空调上的测试

### 2.1 实验装置

为了验证 R290/R600a (60%/40%) 混合物灌注式替代 R134a 的可行性, 对 R290/R600a (60%/

40%) 和 R134a 在汽车空调上进行了测试. 测试在标准房间量热器室中进行, 如图 5 所示, 量热器室的温度和湿度控制精度分别为  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  和  $\pm 5\%$ . 测试工况按汽车空调的行业测试标准, 详见表 1. 测试用空调器选用型号为: KQZN14 巴士顶置式空调, 测试所用压缩机为开式活塞压缩机, 排量为:  $313\text{ ml} \cdot \text{rev}^{-1}$ , 膨胀阀为外平衡式热力膨胀阀, 容量为  $10.5\text{ kW}$ . 测试中 R134a 和 R290/R600a 的充注量分别为  $2.2\text{ kg}$  和  $0.9\text{ kg}$ .

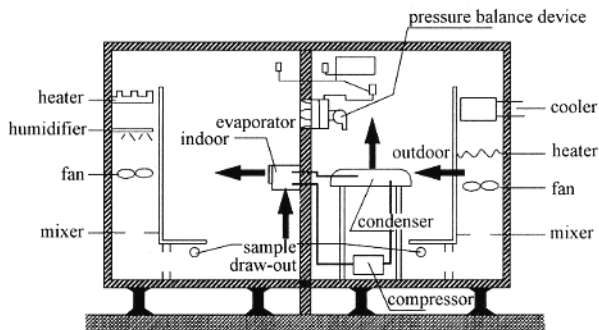


Fig. 5 Room Watts meter

## 2.2 测试结果讨论

表 1 给出了 R290/R600a (60%/40%) 灌注式 (drop-in) 替代 R134a 在巴士汽车空调上的测试结果, 其中, HQ(1) 为膨胀阀未作调整时的测试结果, HQ(2) 为膨胀阀弹簧预紧力作调整后的测试结果. 在膨胀阀不作调整的情况下, R290/R600a (60%/40%) 的制冷系数与 R134a 相当, 制冷量比 R134a 高约 12.4%. R290/R600a (60%/40%) 的吸气温度比 R134a 低, 排气温度比 R134a 低得更多, 这说明蒸发器出口过热度较低, 压缩

机进气中带液, 需对热力膨胀阀进行调整. 对膨胀阀弹簧预紧力作调整后, 压缩机的吸排气温度均有所上升, 制冷量则稍有下降, 比 R134a 高约 10%, 制冷系数相对 R134a 高约 2%.

## 2.3 热力膨胀阀的调整

图 6 给出了外平衡式热力膨胀阀连接及膜片的受力示意, 由图中可以看出, 外平衡式热力膨胀阀的开度受蒸发压力  $p_0$ 、感温包内压力  $p_s$  和弹簧预紧力  $p_f$  控制, 膨胀阀膜片的力平衡关系可由式 (3) 表示

$$p_0 + p_f = p_s \quad (3)$$

这三者的关系随蒸发温度变化情况如图 7 中实线所示, R290/R600a (60%/40%) 的汽相饱和压力随温度的变化曲线如图中虚线所示. 在充注 R290/R600a (60%/40%) 后, 在蒸发温度较高的情况下 (约大于  $-10^\circ\text{C}$ ), 由于 R290/R600a (60%/40%) 的汽相饱和压力比 R134a 低, 原来使用 R134a 的制冷装置在未作膨胀阀预紧力调节的情况下改充 R290/R600a (60%/40%) 后, 会因为弹簧的预紧力较小, 造成蒸发器出口的温度较低, 过热度减小 (由  $\Delta t_{sh}$  变为  $\Delta t'_{sh}$ ), 引起过液量较大. 由于蒸发器出口过热度减小, 可能会造成压缩机吸气带液, 这样会造成压缩机的效率降低. 由表 1 中可以看出, 制冷系统在改充 R290/R600a (60%/40%) 后压缩机的排气温度比 R134a 的排气温度有明显降低 (低约  $16^\circ\text{C}$ ), 这说明压缩机的吸气中已经带液. 适当增加膨胀阀的弹簧预紧力 (由  $p_f$  调整为  $p'_f$ ), 使得压缩机的吸入口过热度提高, 有利于提高整个装置的制冷系数.

Table 1 Comparison between R290/R600a (60%/40%) and R134a in a bus air conditioner

Items	Dry bulb temp./ $^\circ\text{C}$		Relative humidity at evaporator inlet/%	Suction temp./ $^\circ\text{C}$
	At condenser inlet	At evaporator inlet		
R134a	35	27	50	6.9
HQ(1)	35	27	50	5.2
HQ(2)	35	27	50	10.7
Discharge temp./ $^\circ\text{C}$	Power consumption /kW		Refrigeration capacity/kW	Refrigeration coefficient
84.2	7.346		11.176	1.521
68.2	8.256		12.564	1.522
82.9	7.974		12.300	1.543

